

причем при повышении температуры нагрева от  $A_{C1}$  до  $A_{C3}$  (таблица 2).

### Литература

1. **Перспективы** применения высокопрочных среднелегированных сталей в сварных баллонах высокого давления для автотранспорта / Б.Е. Патон [и др.] // Автомат. сварка. – 1994. – № 3. – С. 4–9.
2. **Особенности** аргонодуговой обработки с подплавлением сварного соединения закаливающейся стали / В.М. Кулик [и др.] // Автомат. сварка. – 2004. – № 3. – С. 19–22.
3. **Оценка** сопротивляемости ЗТВ высокопрочной стали замедленному разрушению с моделированием релаксации напряжений / В.М. Кулик [и др.] // Автомат. сварка. – 2005. – № 4. – С. 19–26.
4. **Вознесенский, В.А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.
5. **Жарский, И.М.** Планирование и организация эксперимента: Учебное пособие / Б.А. Каледин, И.Ф. Кузьминский; под ред. И.М. Жарского. – Минск: Изд-во БГТУ, 2003. – 179 с.

УДК 669.58

**В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,  
И.А. БУЛОЙЧИК (БНТУ)**

### **АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЦИНКОВАНИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

В связи с постоянным ростом цен на энергоносители перспективу представляют только те технологии цинкования, которые в состоянии обеспечить получение качественной антикоррозионной защиты при минимальных энерго- и ресурсозатратах.

В таблице 1 представлены основные особенности современных технологий термодиффузионного цинкования (ТДЦ).

Таблица 1 – Уровень современных разработок в области термодиффузионного цинкования

Организация-разработчик	Страна	Особенность технологии
Distek	Израиль	Применение смесей без инертных добавок + дополнительная пассивация в растворах ортофосфорных кислот
Levicor	Бельгия	Применение специально разработанных порошков с повышенной проникающей способностью в совокупности с пассивационными растворами
Вика-Гал	Россия	Применение гидротермальнообработанных насыщающих смесей. Реализация принципа высокотемпературного цинкования
Sherardise-UK LTD	Великобритания	Применение дуплекс-систем. Создание многоуровневой защиты с дополнительным нанесением органического фторполимерного покрытия
БНТУ кафедра «Материаловедение в машиностроении»	Беларусь	Реализация принципа восстановительной атмосферы в насыщающем пространстве контейнера при переходе в газовую фазу одного из компонентов насыщающей смеси

Известно, что одним из основных недостатков традиционных процессов химико-термической обработки (ХТО) является их длительность по отношению к общему циклу изготовления изделия [1]. В связи с этим одной из первостепенных задач является сокращение времени формирования покрытия на изделии, то есть интенсификация процессов цинкования. Следует отметить, что к настоящему моменту накоплен определенный опыт по интенсификации процес-

сов ХТО и выделен ряд интенсифицирующих факторов. Однако большинство из них относится к высокотемпературным процессам ХТО, таким, например, как борирование либо хромирование [1–3]. Технологии цинкования являются низкотемпературными процессами ХТО, что изменяет характер воздействия интенсифицирующих факторов. Более того, с учетом снижения активности диффузионных процессов при понижении температуры, а также с учетом ряда технологических особенностей процесса цинкования, изменится и набор интенсифицирующих факторов по сравнению с факторами высокотемпературных процессов ХТО.

При попытке интенсификации процессов ХТО основной упор, как правило, делается на ускорение лимитирующей стадии процесса. В то же время известно [1], что любая из элементарных стадий ХТО может являться лимитирующей, поэтому при изучении влияния различных факторов на ускорение процессов цинкования целесообразно изучить влияние каждого из них на определенные стадии данного вида ХТО в отдельности. Следует учитывать, что на сегодняшний день существует ряд способов нанесения диффузионных защитных цинковых покрытий и в зависимости от того, каким из способов проводится цинкование, стадийность ХТО может несколько изменяться (таблица 2).

Так, для цинкования в расплаве наблюдается отсутствие 1-й стадии ХТО (сам расплав обеспечивает подвод насыщающего элемента к поверхности металла). При цинковании в порошках 1-й стадией ХТО является образование газа-носителя (компоненты), а уже затем посредством диффузии в насыщающей среде осуществляется подвод насыщающего элемента к поверхности металла.

Следует отметить, что традиционно для ускорения подвода атомов цинка к поверхности детали использовали активаторы на основе хлористых соединений (интенсификация стадий 1 и 2). Однако с целью снижения токсического воздействия данных соединений целесообразно исключить применение токсических активаторов при реализации процессов ТДЦ.

При рассмотрении возможности интенсификации первых двух стадий ХТО актуальным является замена традиционных активаторов комплексами неорганических и органических веществ, которые при рабочих температурах разлагаются, активируя атомы цинка и способствуя увеличению скорости насыщения поверхности сталь-

ных изделий. Летучие компоненты активатора могут образовывать с испарившимися атомами цинка комплексы, связанные силами Ван-дер-Ваальса. Эти комплексы, обладая значительной подвижностью, перемещаются в пространстве контейнера, входят в соприкосновение с поверхностью детали и адсорбируются на ней, тем самым повышая концентрацию атомов цинка в поверхностной зоне насыщаемой детали.

Таблица 2 – Анализ элементарных стадий ХТО с учетом процессов, протекающих при термодиффузионном цинковании

Стадия ХТО	Место реализации стадии	Парофазовый способ	Парогазовый способ
1. Реакции в реакционной среде. Образование компоненты, осуществляющей массоперенос диффундирующего элемента.	Реакционное пространство, окружающее изделие	Испарение цинка. Формирование паровой фазы необходимого давления. Диффузия атомов цинка к поверхности металла	Испарение цинка, диссоциация активирующих добавок, формирование восстановительной атмосферы, взаимодействие паров цинка с активирующими элементами
2. Диффузия в реакционной среде. Подвод насыщающего элемента к поверхности металла			Диффузия активированных соединений цинка (например, $ZnCl_2$ ) к поверхности металла.
3. Реакции на границе раздела фаз. Адсорбция, хемосорбция активных атомов или молекул легирующего элемента насыщаемой поверхностью	На границе раздела «насыщающая среда – обрабатываемая поверхность»	Адсорбция атомов цинка металлической поверхностью	Распад активированных соединений цинка. Например, $ZnCl_2 + Fe \rightarrow FeCl_2 + Zn$ . Восстановление оксидов с насыщаемой поверхностью
4. Диффузия в металле	В поверхностной зоне металла	Взаимная диффузия атомов цинка и железа с формированием интерметаллидных фаз диффузионного слоя	Взаимная диффузия атомов цинка и железа с формированием интерметаллидных фаз диффузионного слоя
5. Реакции в металле образование твердых растворов, химических соединений			

Одним из основных факторов, определяющим скорость протекания диффузионных процессов при ТДЦ, является давление паров

цинка в реакционном пространстве контейнера. Повышение давления паров цинка может быть достигнуто за счет увеличения температуры цинкования, что, в свою очередь, может привести к оплавлению насыщающей смеси. Следует, однако, учесть, что при одинаковом значении давления паров цинка процесс диффузионного насыщения будет идти активнее в реакционном пространстве с меньшим содержанием кислорода. Удаление кислорода из рабочего пространства печи, а также предотвращение окисления насыщаемой детали в процессе цинкования является актуальной задачей при реализации способов интенсификации диффузионных процессов. Применение систем вакуумирования позволяет удалять кислород из рабочего пространства печи, повышая таким образом диффузионную активность атомов. Следует отметить, что при определенном давлении и температуре во время взаимодействия паров воды с оксидами железа по реакции  $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeO} + \text{H}_2$  (химическое восстановление воды с выделением водорода) за счет выделившегося из воды водорода происходит восстановление оксидов с поверхности деталей, что существенно ускоряет диффузию цинка (при этом фактически создается восстановительная атмосфера). Аналогично будет взаимодействовать с железом и  $\text{CO}_2$ , образуя  $\text{FeO}$  и  $\text{CO}$ . Добавление воды либо углекислых солей в реакционное пространство активизирует восстановительные процессы, снижая влияние кислорода на насыщаемую поверхность, тем самым обеспечивая ускорение 3-й стадии ХТО.

При изучении интенсификации процессов цинкования следует рассмотреть воздействие такого фактора, как «изменение скорости движения насыщающей среды (в том числе динамические, псевдокипящие среды)». По данным литературных источников [4, 5] применение псевдокипящих сред для получения защитных коррозионностойких покрытий на основе цинка позволяет повысить скорость формирования диффузионного слоя за счет более интенсивного подвода атомов цинка к насыщаемой поверхности. При реализации процессов ТДЦ следует рассмотреть возможность повышения скорости вращения контейнера при цинковании мелких изделий в контейнерах небольшой емкости. С учетом стадий ХТО, представленных в таблице 2, оба процесса идут одинаково. Разница заключается в скорости прохождения определенной стадии ХТО. Можно предположить, что первые две стадии, связанные с процессами

образования насыщающей компоненты и ее подвода к поверхности насыщаемого изделия для процесса термодиффузионного цинкования во вращающемся контейнере, будут значительно ускорены за счет механического взаимодействия порошка цинка между собой и с поверхностью насыщаемой детали.

Среди факторов физического воздействия особый интерес представляет использование индукционного нагрева для длинномерных изделий, как в качестве предварительного нагрева изделия перед нанесением цинка с целью активации поверхности, так и в качестве окончательной термообработки (после нанесения цинка) с целью формирования диффузионного слоя.

Повысить активность протекания 4-й и 5-й стадий ХТО (таблица 2) при процессах ТДЦ возможно созданием напряженного состояния в поверхностной зоне детали, что особенно актуально при цинковании длинномерных изделий, а также с применением ультразвукового облучения, что может быть актуальным при цинковании в контейнерах с небольшим объемом. При рассмотрении возможных способов интенсификации ТДЦ актуальным является использование рекристаллизационных процессов, имеющих место при нагреве деформированного металла. С учетом температур рекристаллизации для ряда конструкционных и строительных сталей порядка 450–600 °С существует объективная возможность интенсификации диффузионных процессов за счет протекания начальных стадий рекристаллизации. В частности, процессов полигонизации и первичной рекристаллизации (формирование мелкозернистых структур), протекающих при температурах порядка 350–450 °С, что уже сопоставимо с температурами термодиффузионного цинкования.

Рассматривая основные стадии химико-термической обработки в сопоставлении с интенсифицирующими факторами для процесса ТДЦ, следует отметить, что актуальным является ускорение именно первых 3-х стадий ХТО. С учетом того, что процессы цинкования относятся к низкотемпературным типам ХТО, возможность влияния на диффузионную подвижность атомов в твердом теле (металле) на стадии 4 и 5 ограничена. В связи с этим, суммарный положительный эффект от ускорения первых 3-х стадий ХТО будет значительно выше по сравнению с попытками интенсификации диффузионных процессов в металлической основе.

Реализация представленных способов интенсификации диффузионных процессов цинкования позволит сократить время обработки изделия, а также снизить энергозатраты при реализации данных процессов в производственных условиях.

### **Литература**

1. **Ворошнин, Л.Г.** Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
2. **Пантелеенко, Ф.И.** О классификации способов интенсификации процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / Ф.И. Пантелеенко, Л.С. Ляхович, Б.С. Кухарев // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск, 1980. – Вып. 14. – С. 5–6.
3. **Пантелеенко, Ф.И.** Интенсификация диффузионного хромирования углеродистых сталей / Ф.И. Пантелеенко // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск, 1980. – Вып. 14. – С. 7–8.
4. **Баландин, Ю.А.** Диффузионное комплексное цинкование в виброкипящем слое как способ повышения коррозионной стойкости деталей машин / Ю.А. Баландин, А.С. Колпаков, Е.В. Жаров // *Автомобильная промышленность.* – 2006. – № 11. – С. 31–32.
5. **Баландин, Ю.А.** Диффузионное многокомпонентное цинкование стали 40Х в виброкипящем слое / Ю.А. Баландин, А.С. Колпаков, Е.В. Жарков // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2009. – № 1. – С. 46–49.

УДК 621.7

**В.М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук,  
**Г.А. ТКАЧЕНКО**, канд. техн. наук (БНТУ)

### **АНАЛИЗ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ**

Широко используемые процессы термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, основанные на однократном нагреве и охлаждении, наиболее распространены в про-